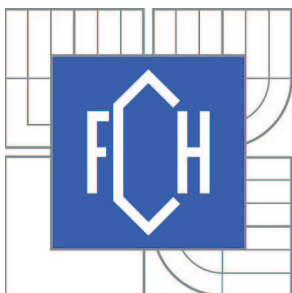


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ
FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

BAREVNÉ MOŽNOSTI UMĚLÝCH PÍSKOVců NA GEOPOLYMERNÍ BÁZI

COLOR POSSIBILITIES OF ARTIFICIAL SANDSTONES BASED ON GEOPOLYMERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Mgr. PAVEL LATTENBERG

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	FCH-BAK0545/2010	Akademický rok: 2010/2011
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	Mgr. Pavel Lattenberg	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.	
Konzultanti:		

Název bakalářské práce:

Barevné možnosti umělých pískovců na geopolymerní bázi

Zadání bakalářské práce:

Na základě laboratorních experimentů zvolit jeden až dva vhodné pojivové systémy na bázi geopolymérů pro přípravu syntetických pískovců.

Pro tyto systémy otestovat možnosti cíleného řízení barevnosti připraveného pískovce anorganickými barvivy či zbarvenými přírodními písky.

Termín odevzdání bakalářské práce: 6.5.2011

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Mgr. Pavel Lattenberg
Student(ka)

Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2011

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá zkoumáním možností přípravy umělých pískovců na geopolymerní bázi a způsoby dosažení přírodního vzhledu a dobrých mechanických vlastností. Teoretická část je věnována současnému stavu v oblasti poznání geopolymérů, jejich využití, možnostem, ale také přírodnímu pískovci a jeho geografické různorodosti.

Praktická část se zabývá přípravou různých typů pojivových systémů na základě metakaolinu, mleté vysokopeční strusky a vodního skla. Jejich porovnáním, a také možnostmi úprav vzhledu a vlastností změnou složení plniva.

ABSTRACT

This thesis deals with the possibility of preparing artificial sandstone based on geopolymer matrix and ways to achieve a natural appearance and good mechanical properties. The theoretical part is devoted to the current state of knowledge in the field of geopolymers and their recovery potential, but also the natural sandstone and its geographic diversity.

The practical part deals with the preparation of various types of binding systems based on metakaolin, ground blast furnace slag and water glass. Their comparison, and the possibility the appearance and characteristics change in the composition of the filler.

KLÍČOVÁ SLOVA

pískovec, geopolymery, alkalická aktivace, metakaolin, vodní sklo, umělý kámen

KEY WORDS

sandstone, geopolymers, alkaline activation, methakaolin, water glass, artificial stone

LATTENBERG, P. *Barevné možnosti umělých pískovců na geopolymerní bázi*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2011. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....

podpis studenta

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Opravilovi, PhD. za odborné rady, vstřícný přístup a praktické připomínky při realizaci práce.

OBSAH

I	ÚVOD	5
II	Teoretická část.....	6
1	Pískovec.....	6
2	Geopolymery	8
2.1	Historie geopolimerů.....	9
2.2	Současný stav v oblasti vývoje geopolimerů	10
2.3	Struktura geopolimerů.....	10
2.4	Složení geopolimerů	11
2.4.1	Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci	11
2.4.2	Alkalické aktivátory	13
2.5	Mechanismus geopolimerace	15
2.6	Reakční podmínky geopolimerace.....	16
2.7	Vlastnosti geopolimerů	16
2.8	Umělý kámen a možnosti využití geopolimerů v ochraně kulturního dědictví	17
III	praktická část	18
3.1	Použité suroviny a jejich označení.....	18
3.2	Příprava zkušebních směsí.....	19
3.3	Složení zkušebních směsí	19
3.4	Příprava zkušebních vzorků.....	22
3.5	Použité zkušební metody	22
3.5.1	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.....	22
3.5.2	Tvorba výkvětů.....	24
3.5.3	TG-DTA	25
IV.	Výsledky a diskuze.....	26
4.1	Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu	26
4.1	Výsledky stanovení pevnosti v tlaku	27
4.2	Výsledky TG-DTA	28
4.3	Výsledky pozorování tvorby výkvětů.....	30
4.4	Stanovení objemové hmotnosti.....	31
4.5	Vizuální hodnocení jednotlivých směsí	31
4.5.1	Základní zkušební směsi A, A+, B, B2, C, C+, D, D2.....	31

V. Závěr	37
Seznam použitých zdrojů	38
Seznam použitých zkratek a symbolů	40
Přílohy	41

I ÚVOD

V dnešní době, kdy stále ještě prožíváme nebývalý stavební boom a s ním spojenou obrovskou potřebu stavebních hmot, především pak cementu, nám velmi důrazně vyvstávají i negativní stránky tohoto odvětví. Největším problémem je ohromná zátěž životního prostředí těžbou, spotřebou energetických zdrojů a v neposlední řadě ohromným množstvím produkovaného oxidu uhličitého. Stejně jak postupuje vývoj v různých průmyslových oblastech, nezůstává ani výzkum stavebních hmot pozadu.

Jednou ze současných možností, jak snížit zátěž životního prostředí, aniž bychom museli slevovat z nároků na vlastnosti materiálů, jsou geopolymery. Tento progresivní materiál není jen ekologickou náhražkou, ale svými vlastnostmi současné stavební hmoty v některých vlastnostech dokonce převyšuje. V poslední době je mu proto věnována značná pozornost a podle optimistických odhadů by v nedaleké budoucnosti mohl současné stavební hmoty ve velké míře nahradit. K tomu je však zapotřebí ještě spousta práce.

Jednou z nezanedbatelných vlastností geopolymerních kompozitů je jejich snadná modifikace struktury a vzhledu, což vede k využití tohoto materiálu pro dekorální a umělecké předměty. V této oblasti jsou právě vlastnosti jako barva, charakter povrchu, opracovatelnost stejně důležité jako například pevnost v tahu nebo tvrdost.

Potenciál tohoto materiálu je obrovský a množství oborů, do kterých pravděpodobně zasáhne zrovna tak. Je proto nesmírně důležité výzkum zaměřit co nejvíce směry, aby byly odhaleny všechny dostupné možnosti tohoto materiálu.

II TEORETICKÁ ČÁST

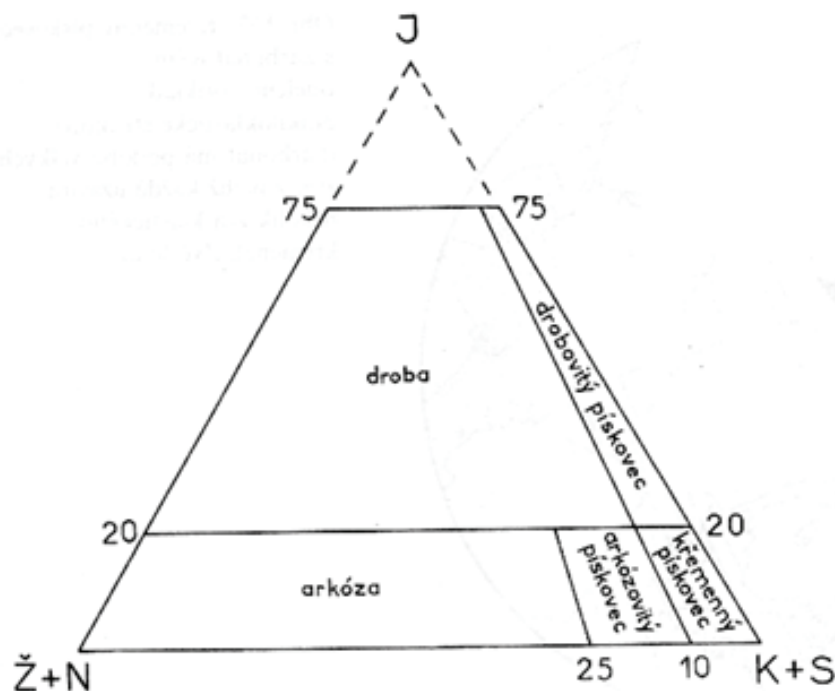
1 Pískovec

Pískovec je v našich podmínkách nejrozšířenější, a také asi nejoblíbenější užitkový kámen vůbec. Jeho obliba vrcholila především v období gotiky, baroka a historizujících stylů konce 19. století. (1) Jeho významnou předností byla jeho poměrně snadná dostupnost na většině našeho území a snadná opracovatelnost. V dnešní době je jeho využití již podstatně menší především díky novým stavebním materiálům a poměrně snadné dostupnosti jiných ušlechtilých kamenů.



Obr. 1 Ukázka rozdílnosti barevnosti a struktury několika pískovců

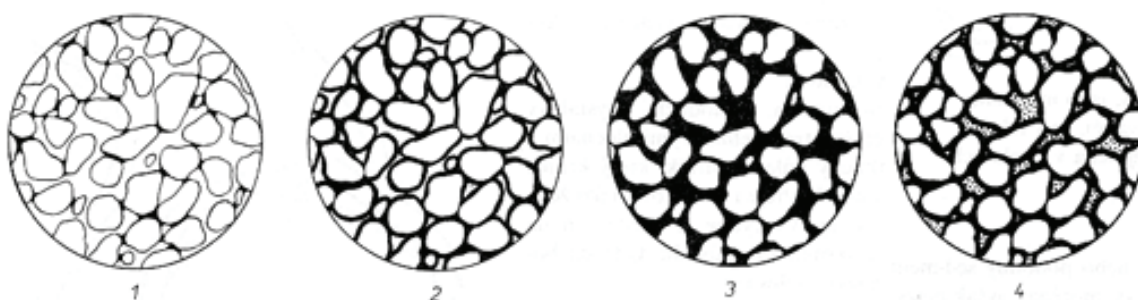
Jako pískovec je označována pevná klastická (úlomkovitá) usazená hornina různého petrografického charakteru, především nerostného složení a různé zrnitosti, která je tvořena pískovými zrny a základní hmotou (neboli matrix). Základní klasifikace vychází z nerostného složení a dělí pískovce do několika základních skupin, jak lze nejlépe vidět na trojúhelníkovém diagramu (obr. 1) (2). Toto dělení je založeno na poměru obsahu křemene a stabilních klastických částic k obsahu živců, jiných nestabilních hornin a vlastní matrix.



Obr. 2 Trojúhelníkový diagram pro klasifikaci pískovců: J - jíl, silt a slídy (tj. základní hmota neboli matrix), K - S - křemen a zrna stabilních hornin, Ž + N - živce a úlomky nestabilních hornin.

Podle zrnitosti se pískovce dělí na jemnozrné (velikost částic 0,063 až 0,25 mm), středozrné (0,25 až 1 mm) a hrubozrné (1 až 2 mm) (1).

Prostor mezi jednotlivými zrny může být volný nebo vyplněný pojivem. Jako pojivo chápeme strukturně odlišnou složku sedimentární horniny, která v ní zajišťuje soudržnost. Pojivo může být primární (usazené zároveň s klastickými částicemi) nebo sekundární (usazené druhotně). Primární pojivo bývá označováno jako základní hmota a sekundární jako tmel. Tmel je chemogenního původu a vzniká vyloučením minerálních látek z pravých nebo koloidních roztoků. Tmely lze podle rozložení dělit do čtyř základních skupin: dotkový, povlakový, pórový a výplňový (Obr. 2). Dále rozlišujeme pískovce s tmelem křemitým (nejodolnější), vápenatým, obecně uhličitánovým, jílovým (kaolinit), železitým, apod. (3)



Obr. 3 Tmel klastických sedimentů: 1 - dotkový neboli kontaktní, 2 - povlakový, 3 - pórový, 4 - výplňový (2)

Tmel je pro pískovec velice důležitý a závisí na něm řada jeho vlastností. Pórovitost je například ovlivněna nejenom jeho množstvím, ale i rozmístěním. Pískovec s pórovým nebo výplňovým tmelem má nejen nižší pórovitost, ale i nižší nasákavost, vyšší pevnost a odolnost proti zvětrávání. Tmel se podílí i na barvě pískovce a jeho chemickou stabilitou je dána chemická odolnost celého pískovce.

Je nutné si uvědomit, že jednotlivé pískovce se v závislosti na místě výskytu svými vlastnostmi značně liší. To si lze dobře uvědomit srovnáním vlastností hlavních druhů pískovců ČR. (1)

Pískovce se potýkají s řadou špatných vlastností, jako je poměrně nízká mrazuvzdornost, pevnost v tlaku i pevnost v tahu za ohybu a malá odolnost proti korozi. Toto jsou poměrně limitující faktory jejich využití, s kterými je nutné při jejich použití počítat. Pískovce je dobré využívat pro praxí ověřené účely, kde mohou uplatnit své přednosti, především snadnou štípatelnost. (1)

Lokalita	Hodnota	Objemová hmotnost	Pórovitost	Nasákavost v % hmotnosti	Nasákavost v % objemu	Pevnost v tlaku po vysušení MPa	Pevnost v tlaku po nasáknutí MPa	Pevnost v tlaku za ohybu	Typ pískovce dle tmelu
Božanov	m	2,16		5,5	12,1	58	47	4,5	křemenný
	M	2,21		6,5	14,0	72	62	4,8	
	Ø	2,18		6,1	13,2	66	56	4,6	
Řeka	m	2,46	3,71	1,24		74	67		křemenný
	M	2,59	10,52	4,24		112	89		
Kutná Hora – Vyšatova skála	Ø	2,31	12,66	4,49	10,38	62	49	6,1	silně vápnitý
Choustníkovo Hradiště – Ferdinandov	m	2,19		3,4		42	30	4,3	arkózovitý až křemenný
	M	2,30		6,3		109	106	9,9	
	Ø	2,25		4,6		84	72	7,7	
Votuz	m	2,06		3,7	10,3	40	38	3,2	křemenný
	M	2,27		6,9	16,2	73	56	6,8	
	Ø	2,11		6,0		58		5,9	
Doubrava	m	1,91		3,4	7,4	19	21	2,5	
	M	2,15		11,9	22,7	64	53	5,1	
	Ø	2,03		8,36		40		4,2	
Hořice v Podkrkonoší (sv. Josef)	m	2,00		6,3	13,0	21	12	2,2	křemenný
	M	2,07		9,0	18,1	62	53	6,3	
Podhorní Újezd	m	1,89		5,45	12,3	17	13	1,1	křemenný
	M	2,28		10,1	22,19	45	38	3,4	
	Ø	1,96		1 9,32	18,25	36	24	2,1	
Libná	m	2,16		4,6	10,32	33	26	2,7	křemenný
	M	2,25		5,9	12,93	49	49	5,2	
	Ø	2,23		5,3		39	34	4,3	
Mšené – lázně	m	1,85	26,25	10,8	20,9	23	19	0,9	křemenný
	M	1,93	29,67	13,3	24,6	33	32	1,6	
Nučice		2,24	15,59	6,02	13,5	49	35	2,1	arkózovitý
Úpice		2,27	14,10	4,34	9,87	67	46	7,4	arkózovitý
Doksy		2,24	14,13	4,54	10,18	51	43	4,6	arkóza

Tab. 1 Některé fyzikální vlastnosti hlavních druhů pískovců v České republice. m – minimum, M – maximum, Ø - průměrná hodnota

2 Geopolymery

Pojmem geopolymery dnes označujeme syntetický anorganický polymerní materiál, připravený v alkalickém prostředí polykondenzační reakcí materiálů obsahujících hlinitokřemičité látky. (4) Poprvé tento termín použil francouzský profesor Davidovits pro materiál s aktivovaným metakaolinem, který byl připraven kalcinací s různými typy vápence. Jako synonyma jsou dnes používány výrazy alkalicky aktivované pojivo, hydrokeramika, geocementy, alkalické pucolánové cementy, anorganické hlinitokřemičitanové polymery a anorganické polymery. (4) Obecně se jedná o amorfní hlinitokřemičitý materiál složený z tetraedrálních hlinitých a křemičitých jednotek, které kondenzují při běžné teplotě za

vznikurovnovázných struktur s přítomností jednomocného iontu alkalického kovu (nejčastěji Na, K). Jejich chemické složení je velice podobné zeolitům a vykazují neobvyklé mechanické vlastnosti.

Od svého znovuobjevení ve dvacátém století prodělali tyto materiály značný pokrok, přesto však k jejich masovému použití zatím stále nedošlo a jsou především oblastí intenzivního zájmů různých výzkumných center.

2.1 Historie geopolimerů

Novodobé výzkumy spojené s rozvojem znalostí geopolimerů ukazují, že tento materiál nemusí být pro lidstvo ničím zcela převratným, ale že v jeho historii byl používán již mnohokrát na různých místech světa. Jedná se o informace založené jak na chemických analýzách daných materiálů, tak interpretaci starých textů v novém světle současných poznatků. Tyto nové názory však nejsou širokou i odbornou veřejností zatím zcela přijaty, i když nabízí poměrně logické a podložené odpovědi na řadu doposud nezodpovězených otázek. Pro potvrzení nebo vyvrácení těchto teorií je zapotřebí provést ještě řadu odborných průzkumů a experimentů, které by tento velice zajímavý problém vyřešili.

Pravděpodobně jednou z prvních starověkých civilizací, která dokázala využívat materiálů připravených alkalickou aktivací, byla před 5000 lety civilizace staré Mezopotámie (dnešní území Iráku). Z této doby se nám dochovala řada staveb, z nichž nejznámější jsou zikkuraty. Zatímco většina staveb tehdejší doby byla stavěna z nepálených cihel, bylo průzkumem zjištěno, že střep cihel ze zikkuratu v Uru je podobný střepu pálené keramiky. To samozřejmě částečně vysvětluje vysokou životnost materiálu, ale nabízí jednu velice důležitou otázku: Kde vzali tehdejší lidé dostatek dřeva pro výpal cihel? V okolí totiž rostly pouze nižší rostliny a datlové palmy, které rozhodně nebyly určeny k topení. Použití ropy, které je v okolí dostatek, pro topení můžeme také vyloučit, protože v případě jejího použití by musely být v cihlách po tomto druhu paliva patrné stopy. Nabízí se tedy teorie, že cihly byly připraveny geopolimerací. Tuto teorii podporuje řada aspektů: znalost určitých chemických procesů a dostatek potřebného materiálu (písek, Na a K soli, znalost získávání potaše spalováním určitých rostlin). (5)

Nejdiskutovanější je pravděpodobně použití reaglomerovaného kamene pro stavbu pyramid ve starověkém Egyptě, jak to již v osmdesátých letech prezentoval prof. Davidovits. Tato teorie vyvolala u egyptologů vášnivé diskuse, protože naprosto popírala doposud uznávanou a dlouho vyvíjenou teorii stavby pomocí ramp. Tuto teorii prof. Davidovits zpochybnil na základě mineralogického a chemického průzkumu bloků pyramid v Gíze i na základě starých textů (Stéla hladu aj.). Z výzkumu například vyplývá, že bloky obsahují ve své struktuře vodu, což u přírodního kamene není možné. Samozřejmě se tím vysvětluje otázka transportu obrovských bloků (několik tun), jejich neznámý původ i způsob minimalizace všech spár (maximálně 2 mm). Odpůrci naopak argumentují tím, že nebyly nalezeny na kvádrech žádné stopy po bednění, a že pro tvorbu bednění by byla potřebná pila, kterou tehdejší stavitelé neznali.

Geopolymerní materiály byly pravděpodobně rozšířeny i u původních jihoamerických civilizací v okolí And. Jedná se o řadu staveb, ale také malých sošek, které byly zřejmě připravovány rozpuštěním kamene výtažky z rostlin obsahujících organické kyseliny (šťavelovou, citrónovou a octovou). Rozpuštěný kámen byl pak následně nalit do formy, kde se vytvrdil. Tato teorie je podporována provedenými zkouškami, které potvrdily přítomnost organických látek ve hmotě sošek (např. šťavelan vápenatý). (5)

Na evropském kontinentu došlo po rozpadu Římské říše ke ztrátě mnoha vědomostí, mezi kterými byla pravděpodobně i znalost geopolymérů. Budoucím generacím později trvalo 1500 let k vynalezení portlandského cementu a dalších 150 let k znovuoživení alkalicky aktivovaných materiálů. (5)

Ve 20. století byly alkalicky aktivované materiály poprvé objeveny v roce 1930 (Kuhl), kdy byly pozorovány změny chování strusky v přítomnosti uhličitanu draselného. Především ve čtyřicátých a padesátých letech byl tento objev více studován (Purdon 1940), což vyústilo v objev alkalicky aktivovaného cementu. (6) Glukhovský prezentoval v roce 1959 ve své knize Gruntosilikáty možnost přípravy nového anorganického pojiva z přírodních hlinitokřemičitanů (především jílových minerálů) a alkalických sloučenin (uhličitany, hydroxidy, křemičitany). (7)

V roce 1979 Joseph Davidovits patentoval pod názvem „geopolymery“ alkalické cementy vzniklé smísením alkalických roztoků se směsí kalcinovaného kaolinitu, vápence a dolomitu. Profesor Davidovits se věnoval dále intenzivnímu výzkumu v této oblasti a zasloužil se také díky svým názorům ohledně stavby egyptských pyramid o značnou popularizaci tohoto materiálu.

V posledních dvaceti letech pokračoval vývoj tohoto materiálu na mnoha výzkumných pracovištích po celém světě. Výzkum se zaměřuje na aplikace v nejrůznějších oborech, jak bude uvedeno dále.

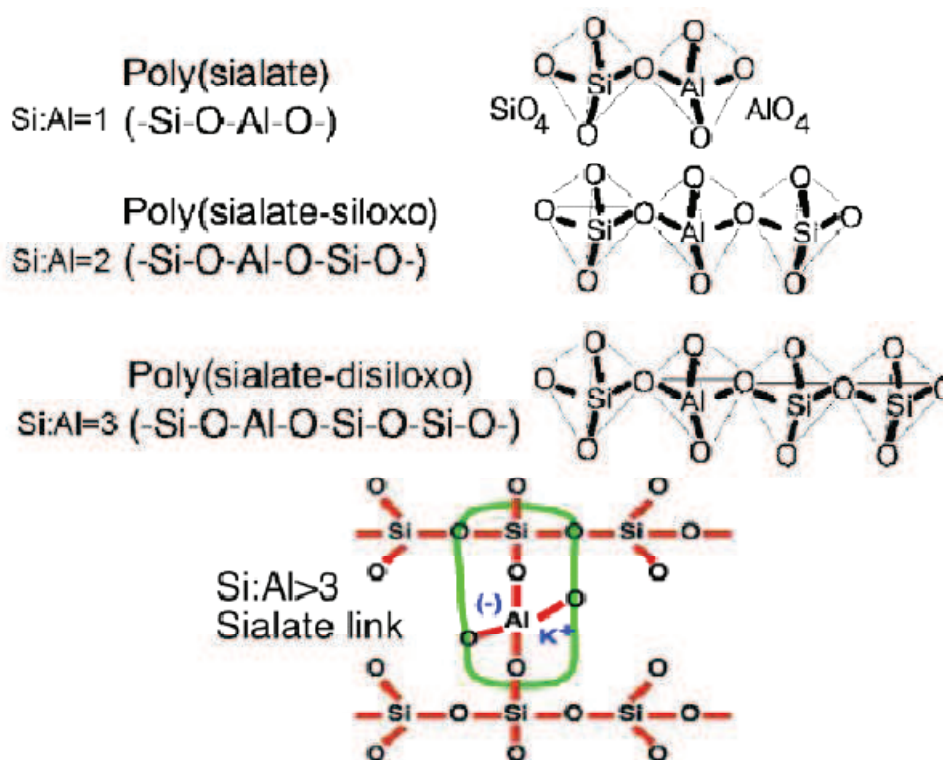
2.2 Současný stav v oblasti vývoje geopolymérů

Geopolymery jsou vyvíjeny pro řadu konkrétních aplikací, kde by se mohly uplatnit jejich vynikající vlastnosti. Hlavní směr vývoje geopolymérů je zaměřen na částečné (možná i úplné) nahrazení současných stavebních hmot, především cementu, jejichž výroba je značně neekologická. Výroba cementu produkuje značné množství CO_2 , který se spolupodílí na tvorbě skleníkového efektu jak přímo (vznik CO_2 při rozkladu vápence), tak nepřímo (vysoká energetická náročnost procesu výroby slínku). Naopak při rozkladu aluminosilikátů uniká do ovzduší pouze voda a navíc tento děj probíhá při teplotě kolem $700\text{ }^\circ\text{C}$, což je asi poloviční teplota potřebná pro přípravu slínku.

Jedním z hlavních problémů relativně malého uplatnění tohoto materiálu v současnosti je nynější stav technologie, jak základních surovin, tak samotné aplikace geopolymérů. Velkou překážkou je také absence právních a technických norem pro suroviny, výrobu a používání geopolymérů. Tyto problémy jsou způsobeny především tím, že se jedná o technologii novou, jejíž produkty zatím nemají pevnou pozici na trhu a silným postavením současných materiálů vyráběných velkokapacitně a tedy s velice nízkou cenou. Z těchto důvodů je blízká budoucnost především ve výrobě materiálů, které nabízí naprosto jedinečné použití. (8) Tyto aplikace jsou velice různorodé, např. ohnivzdorné kompozity s uhlíkovými vlákny, nosiče katalyzátorů ve výfukových potrubích automobilů (Porsche), solidifikace tekutých odpadů, ad. (4)

2.3 Struktura geopolymérů

Pro chemické označení geopolymérů byl prof. Davidovitem navržen název polysialáty. Sialát je zkratka pro oxid křemičito-hlinitý $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-]$ a polysialát vzniká kondenzací těchto jednotek. Sialátové jednotky však mohou obsahovat různý poměr Si/Al, jak lze vidět na obrázku. (9)



Obr. 4 Jednotky polysialátu s různým poměrem SI/Al

Amorfní polymerní síť polysialátu je složena z tetraedrálních aniontů $[\text{SiO}_4]^{4-}$ a $[\text{AlO}_4]^{5-}$, které jsou vzájemně vázány vazbou přes kyslík umístěný v každém rohu tetraedru. Vlivem přítomnosti Al^{3+} vzniká ve struktuře záporný náboj, který musí být kompenzován přítomností pozitivního iontu (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ , H_3O^+). (10) Platí zde Loewensteinovo pravidlo, podle kterého nemůže existovat vazba $[-\text{Al}-\text{O}-\text{Al}-]$ a dva tetraedry obsahující Al^{3+} mohou být spojeny pouze vazbou přes minimálně jeden tetraedr obsahující křemík. Naopak vazba $[-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-]$ je naprosto běžná. (10)

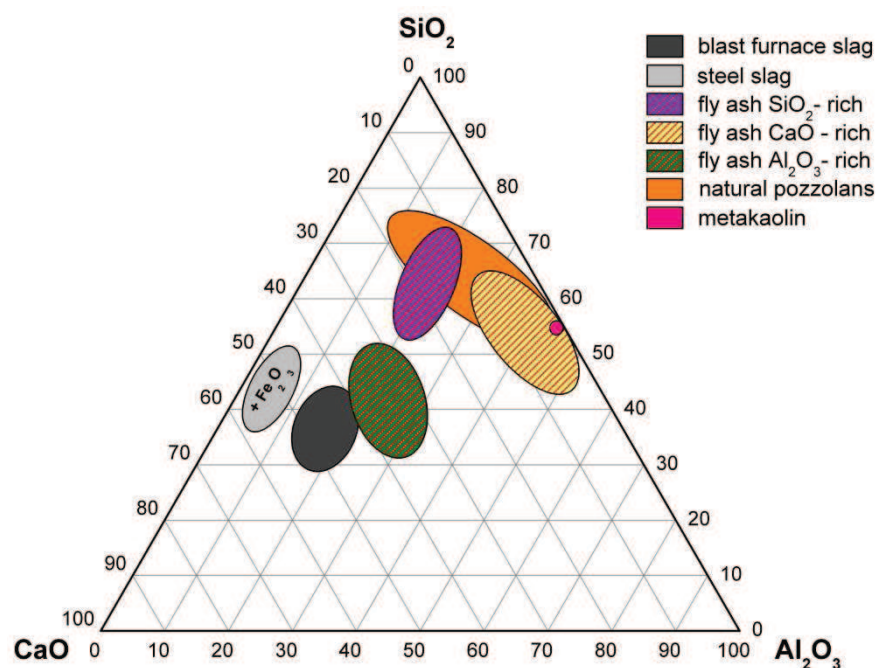
Amorfní geopolymerní materiál je porézní a v jeho pórech bývá obsažena voda, která zde figuruje jako nosič alkalického aktivátoru. Její vyšší obsah však vede ke snižování pevností a je tedy nežádoucí. Optimalizované složení je $1,2 \text{ Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. (11) Na pevnost má vliv samozřejmě i řada dalších parametrů, např. molární poměr $\text{Na(K)} : \text{Si} : \text{Al}$.

2.4 Složení geopolymérů

Geopolymery se připravují z těchto základních komponent: aktivovaná složka na bázi hlinitokřemičitanu, aktivátor a plnivo. Pro zlepšení určitých vlastností jsou ještě přidávána různá aditiva.

2.4.1 Materiály vhodné pro alkalickou aktivaci

Obecně lze říci, že pro tvorbu geopolymérů je možné využít materiál obsahující amorfní hlinitokřemičitany. Tyto materiály existují přírodní i syntetické a jejich složení může být různé, jak lze vidět na následujícím obrázku. Nejčastěji se jedná o kaolinitické hlíny, popílký, vysokopecní strusku nebo jiné směsi. Jejich aktivita je ovlivněna nejen chemickým složením, ale i fázovým složením, velikostí měrného povrchu (jemnost mletí) a mírou aktivace (pro aktivitu jílu je důležitá teplota kalcinace). (12)



Obr. 5 Typické složení materiálů používaných pro alkalickou aktivaci (10)

Metakaolin

Jedná se o vysoce reaktivní metastabilní materiál, připravený kalcinací kaolinu a kaolinitických jíílů při teplotách 650 až 800 °C. Optimální teplota pro dosažení nejlepších vlastností je kolem 700 °C. Metakaolín je vyráběn především z jemnozrnných plavených kaolinů, což výrazně zvyšuje jeho cenu. Proto v současnosti probíhá řada výzkumů pro nalezení nové technologie výroby bez nutnosti úpravy vstupních surovin plavením. (13)

Chem. analýza [%]	CEM I 42,5 R Mokrá	Metakaolin KM 40	Metakaolin Mefisto K-05
SiO ₂	20,1	52	58,7
Al ₂ O ₃	4,74	41	40,70
Fe ₂ O ₃	3,3	1,3	0,58
CaO	63,77	0,27	0,2
MgO	1,05	0,38	0,38
Na ₂ O	0,1	–	–
K ₂ O	0,92	–	0,51
K ₂ O + Na ₂ O	N/A	1,4	N/A
TiO ₂	N/A	0,73	0,53
SO ₃	3,07	–	–
Ztráta žháním	1,3	1,5	1,04

Tab. 2 Ukázka rozdílného chemického složení dvou typů metakaolinů a portlandského cementu (14)

Metakaolíny se nepoužívají pouze pro přípravu čistě geopolymerních materiálů, ale nachází uplatnění i jako perspektivní příměs do betonů, malt a omítek. Velice často zde bývá označován jako tzv. puzolánová přísada, která přispívá k zlepšení fyzikálně mechanických a fyzikálně chemických vlastností. (15) Jeho použití do vápenných omítek navíc vede ke zvýšení odolnosti vůči vodě, agresivním činitelům a také porozity, což je výhodné z hlediska vyšší propustnosti omítky pro vodní páru.

Popílky

Jedná se o odpadní heterogenní materiál nestejného chemického a fázového složení. Hlavní složkou je oxid křemičitý a oxid hlinitý, jejichž obsah bývá až 70 %. Popílky vznikají spalováním tuhých paliv (černé a hnědé uhlí) v elektrárnách a podle způsobu spalování rozlišujeme popílky vysokopeční a fluidní. (12) Produkce obou těchto popílků jenom v Evropě přesahuje 50 000 000 tun ročně. (10) Dnes je popílek používán jako surovina pro výrobu maltovin, cihlářských pálených výrobků, minerálních vláken, atd. (16) V tabulce je uvedeno pro názornost složení konkrétního popílku použitého pro přípravu geopolymery na fakultě stavební VUT.

Surovina	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Síra celkem	ZŽ (1100 °C)
Popílek Chvalčice (PCH)	52,21	29,59	8,44	1,82	1,16	1,66	0,3	0,86	2,12

Tab. 3 Chemické složení popílku (17)

Popílky mohou ve stavebních materiálech působit jako aktivní i jako neaktivní složka, a tedy přispívat nebo nepřispívat k procesu tvrdnutí. (15)

Vysokopeční struska

Je vedlejším produktem výroby železa ve vysokých pecích. Její reaktivita a latentní hydraulické vlastnosti jsou podmíněny jejím fázovým a chemickým složením. Obecně je struska tvořena 30-50 % CaO, 28-40 % SiO₂, 8-24 % Al₂O₃, a 1-8 % MgO. Její kvalita je závislá na rychlosti chlazení (závislost obsahu krystalické fáze, která snižuje reaktivitu strusky), počáteční teplotě struskové taveniny a na zastoupení sklotvorných oxidů. Pro alkalickou aktivaci je vhodná struska s obsahem amorfni fáze vyšším než 90 %, která vzniká rychlým zchlazením. (18) Její produkce přesahuje v Evropě opět 50 000 000 tun ročně a spolu s ocelářskou a slévárenskou struskou tvoří nezanedbatelný potenciální zdroj aktivovaného materiálu.

2.4.2 Alkalické aktivátory

Pro alkalickou aktivaci aktivovaných materiálů je možné použít roztoky alkalických kovů (především draslíku a sodíku) ve formě hydroxidů, křemičitanů, uhličitanů a jejich kombinací. Kombinace jednotlivých typů aktivátorů je poměrně častá. Nejčastěji se používá kombinace křemičitanů a hydroxidů, které umožňují snadnou úpravu molárního poměru SiO₂/Me₂O (křemičitý modul. (19) Kromě těchto látek se občas používají i jiné aktivátory: síran a chlorid sodný nebo vápenatý, vápno).

Aktivátor je stejně jako aktivovaný materiál základní složkou geopolymerní reakce a závisí na něm pevnost a i jiné fyzikální a chemické vlastnosti připravované směsi i konečného materiálu. Kromě typu aktivátoru nebo poměru směšného aktivátoru je velice důležité jeho množství a koncentrace. Intenzivní výzkum v této oblasti, však zatím nenalezl optimální systémy, které by splňovaly jak technologické, tak i ekonomické požadavky širšího použití. Nelze opomenout, že typ aktivátoru (i typ alkalického kationtu, sklony k tvorbě hydrátů a rozpustnost jednotlivých solí) (19) ovlivňuje tendenci vytvářet výkvěty vodorozpustných solí. V tomto směru jsou jako stabilnější uváděny aktivátory na bázi draslíku než sodíku.

Hydroxidy

Hydroxidy sodný a draselný jsou bezbarvé pevné hygroskopické látky se značně korozivními účinky a výbornou rozpustností ve vodě a ethanolu.

Hydroxidy se vyrábí elektrolýzou svých chloridů, která může být prováděna třemi způsoby (amalgámový, membránový a diafragmový), přičemž membránový způsob díky své bezpečnosti nahrazuje oba zbývající. Na našem území jsou tyto hydroxidy vyráběny amalgámovým způsobem v Neratovicích a Ústí nad Labem. (19)

Hydroxid vápenatý se uplatňuje téměř výhradně při aktivaci aktivovaných materiálů přidávaných jako přísada do vzdušných nebo hydraulických maltovin, kde je přítomen ve formě páleného vápna nebo vzniká hydratací CaO.

Uhličitany

Jedná se o soli kyseliny uhličitě, které jsou s výjimkou uhličitanu sodného, draselného a amonného téměř nerozpustné ve vodě. Pro přípravu geopolymérů se nejčastěji používají uhličitany draselné a sodné.

Uhličitan sodný (kalcinovaná soda) se vyrábí dvěma technologiemi, Solvayovou, která jako hlavní surovinu používá chlorid sodný a vápenec a zpracováním trony, což je minerál chemického složení $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ vyskytující se především v USA. Komerčně je nejrozšířenější bezvodá forma, ale je možné setkat se i s dekahydrátem, který je lépe rozpustný. NaCO_3 tvoří bohužel řadu hydrátů, jejichž vznik může způsobovat nežádoucí výkvěty na geopolymerním materiálu. (19) Právě NaCO_3 byl podle prof. Davidovitse aktivátorem použitým při stavbě Egyptských pyramid. (20)

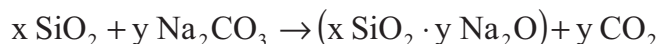
Uhličitan draselný (potaš) se vyrábí z přírodního chloridu draselného tzv. Stassfurtským způsobem nebo karbonatací roztoku hydroxidu draselného. Komerčně jsou kromě bezvodé formy využívány také půlhydrát a dihydrát. (19)

	Rozpustnost ve vodě při 20 °C [g/100 g H ₂ O]		
	sodný	draselný	Lithný
uhličitan	21,5	110,5	1,3
hydroxid	109,0	112,0	12,8

Tab. 4 Porovnání rozpustnosti alkalických uhličitánů a hydroxidů (19)

Vodní sklo

Tímto názvem se označují taveniny alkalických křemičitanů proměnlivého stechiometrického složení, tak především kapalina vzniklá rozpuštěním této taveniny v horké vodě. Křemičitý modul (poměr SiO_2/NaO) takto vzniklého materiálu bývá 2,0 až 3,6. Sodnokřemičité sklo se připravuje tavením oxidu křemičitého (ve formě skla nebo křemenného písku) s uhličitany v kontinuální vanové peci při 1300 až 1400 °C. Při tavení probíhá následující reakce:



Získaná tavenina poskytuje po ochlazení sklovitou hmotu, která se musí za zvýšené teploty a tlaku (rotační nebo stacionární autoklávy) rozpustit. Do autoklávu je vkládáno množství sodnokřemičité frity (pevné vodní sklo) a vody dle kapacity autoklávu a požadovaného typu vodního skla, které chceme získat. Autokláv je natlakován vodní parou na tlak cca 0,6 MPa a ponechán 3-4 hodiny v klidu. Po této době je již rozvařování skla dokončeno a zbytkovým tlakem v autoklávu je jeho obsah přetlačen do zásobníku vodního skla. (19)

Draselné vodní sklo je vyráběno obdobným způsobem za použití draselnokřemičité frity, pouze za nižšího tlaku (do 0,4 MPa). Existují také postupy popisující přímou syntézu draselného vodního skla z křemičité suroviny a hydroxidu draselného. (19)

Rozpustné alkalické křemičitany mají obecný vzorec $\text{Me}_2\text{O} \cdot m \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$. Me je zde kation alkalického kovu (nejčastěji Na^+ , K^+ , Li^+), m a n jsou počty molů SiO_2 a H_2O vztahující se k jednomu molu Me_2O . m je křemičitý modul, který byl již vysvětlen výše. Vodní sklo je koloidním roztokem s velikostí částic v rozmezí 1 až 500 nm a patří mezi tzv. fázové disperzní soustavy, kde částice představují samostatnou fázi oddělenou disperzním prostředím. Velký povrch fázového rozhraní je příčinou velké povrchové energie a značnou termodynamickou nestabilitou. Díky tomu je možné vodní sklo malým zásahem destabilizovat a převést přes přechodovou formu gelu až na pevnou látku. (19)

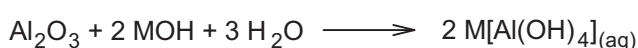
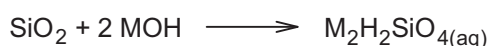
Pro charakterizaci vodního skla se nejčastěji používá vedle křemičitého modulu viskozita, hustota (závislost na koncentraci roztoku) a pH. Vodní skla, jakožto roztoky soli silné zásady a slabé kyseliny jsou silně alkalická. (15)

Použití vodního skla je velmi široké, sodné vodní sklo se používá především jako lepidlo, přísada do odmašťovacích, pracích a čistících prostředků a jako pojivo při výrobě pískových forem ve slévárenství. Draselné vodní sklo se naopak spíše používá pro výrobu nátěrových hmot a tmelů ve stavebnictví. (3)

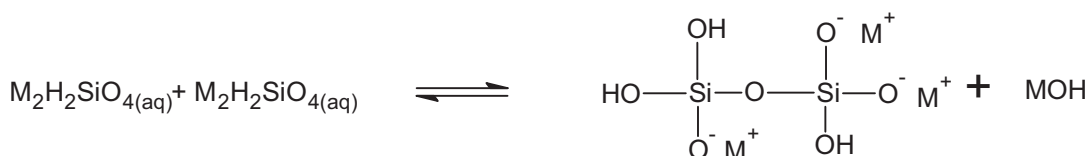
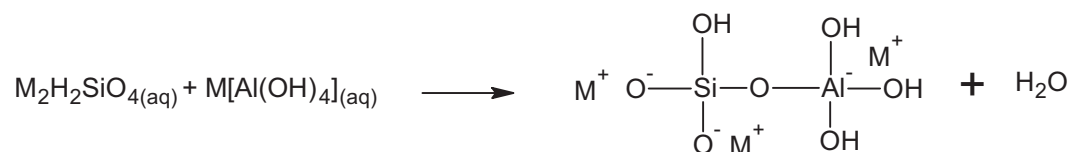
2.5 Mechanismus geopolymery

Přesný reakční mechanismus není doposud zcela objasněn, je však jisté, že zde probíhá řada souběžných reakcí (rozpuštění hlinitokřemičitanového materiálu v alkalickém prostředí, tvorba oligomerů a vznik gelové fáze). (4) Samotný průběh je popisován jako sled tří souběžných dějů:

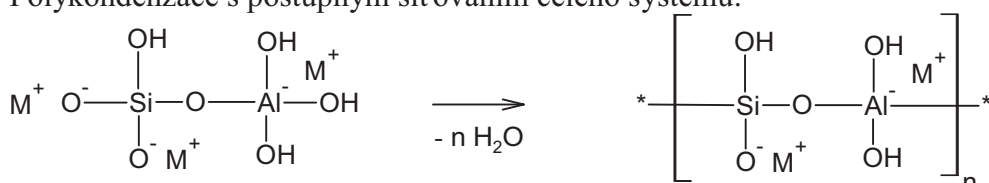
1. Solvatace povrchu a rozpouštění aktivních složek za vzniku monomerů:



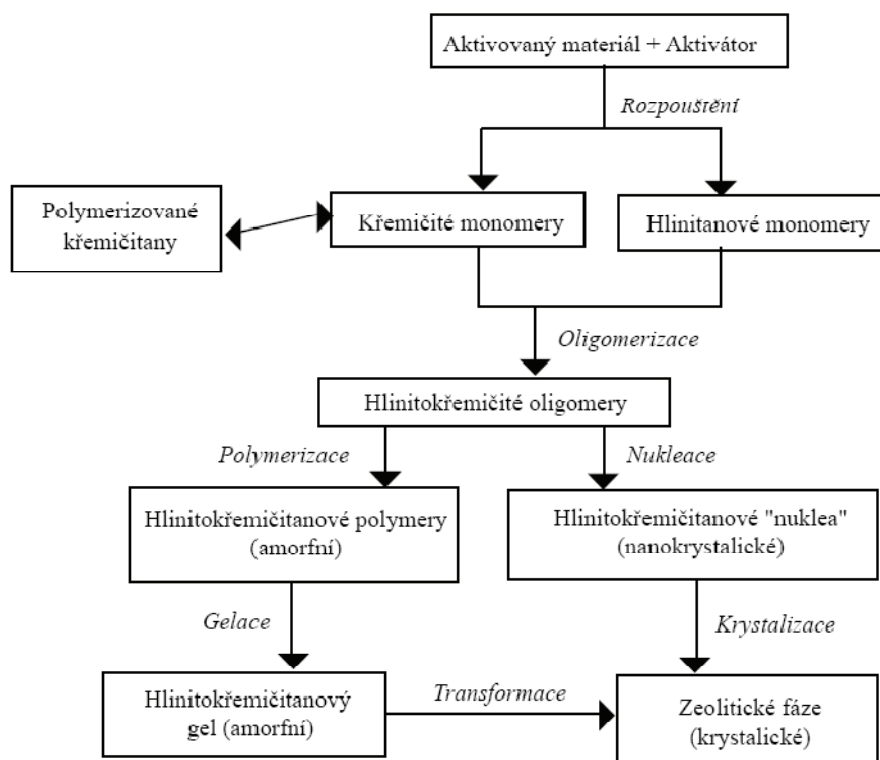
2. Tvorba oligomerů kondenzací nebo autokondenzací:



3. Polykondenzace s postupným síťováním celého systému:



V následujícím schématu jsou jednotlivé děje přehledně zobrazeny i se svou návazností.



Obr. 6 Předpokládaný průběh geopolymeryce podle Provise a van Deventera (4)

Nejprve dochází k depolymeraci hlinitokřemičitanové suroviny v přítomnosti OH^- iontů (silně zásadité prostředí), tím vznikají rozpustné křemičitany a hlinitaný, které se reorganizují kolem alkálií. Následuje polykondenzace a vznik krystalických nebo amorfních fází. Souběžně s rozpouštěním dochází k reakci gelového pojiva s hlinitokřemičitanovým materiálem, čímž vzniká výsledná amorfni až semikrystalická struktura, která geopolymery odlišuje od zeolitů. (4)

2.6 Reakční podmínky geopolymeryce

Geopolymery jsou připravovány řadou postupů, které se většinou shodují v několika základních krocích. Nejdříve jsou připraveny alkalické roztoky hydroxidů, vodního skla nebo jejich směsný roztok. Následně je připravena směs všech práškových komponent, která musí být důkladně homogenizována. V posledním kroku dojde ke smísení alkalického roztoku s homogenizovanou směsí práškových komponent, případně je ještě přidáno plnivo.

Jedná se tedy o heterogenní reakci alkalického roztoku a pevných hlinitokřemičitanů. Průběh heterogenní reakce je silně ovlivňován povahou a koncentrací reagujících složek, teplota, velikost povrchu pevných látek a v některých případech i tlak. Z doposud publikovaných prací na toto téma vyplývá, že na průběh geopolymeryce mají největší vliv krystalové přeměny hlinitokřemičitanové suroviny, měrný povrch reagujících látek, složení reakční směsi, dobré promíchání reakční směsi, vyšší teplota, tlak a doba jejich působení na reakční směs. (4)

2.7 Vlastnosti geopolimerů

Vlastnosti tohoto materiálu jsou významně závislé na typu a množství jednotlivých složek. Proto je poměrně zavádějící psát o vlastnostech geopolimerů obecně. Najdou se ovšem vlastnosti, které platí téměř pro všechny typy geopolimerů. Mezi ně patří nehořlavost, tepelná

odolnost (až do 1200 °C), nerozpustnost ve vodě, odolnost vůči zředěným kyselinám a zásadám a dobrá pojivová schopnost. Významnou vlastností je schopnost základní polymerní sítě uzavírat do své struktury druhotné látky, a tak je imobilizovat. To je důležité pro ukládání nebezpečných odpadů obsahujících například těžké kovy. Některé vlastnosti, jako třeba pevnost a porozita, jsou značně ovlivňovány poměrem pojiva a plniva.

2.8 Umělý kámen a možnosti využití geopolymérů v ochraně kulturního dědictví

S umělým kamenem se v oblasti umění můžeme setkat již v období starověku. Avšak umělý kámen v dnešním pojetí je záležitostí 19. století a souvisí s obdobím historizujících slohů. Umělý kámen byl a je aplikován především ve dvou případech. Prvním je doplňování defektů přírodního kamene (poškozená nebo chybějící místa kamenných částí) a druhým je tvorba dusáním, popřípadě litím do formy. (12)

Požadované obecné vlastnosti jsou pro oba typy aplikací stejné: dobrá kompatibilita s původním materiálem, chemická a biologická odolnost, žádné nebezpečí poškození původního materiálu, shodná nebo alespoň podobná textura, struktura a barevnost. Dále je kladen důraz na trvanlivost, která nemá přesahovat životnost původního materiálu, ale také na možnost reverzibility provedeného restaurátorského zásahu (Restaurátorský a konzervátorský kodex). (12)

Základními složkami umělého kamene jsou plnivo (vlastní hmota materiálu) a pojivo, které může být anorganické nebo organické. Z anorganických pojiv se nejčastěji používají pojiva hydraulická (cement, hydraulické vápno, románský cement). Jejich výhodou je především dosahování bližšího vzhledu a vlastností původního materiálu. Z organických pojiv jsou to především epoxidové a polyesterové pryskyřice. (12)

Oba typy těchto používaných pojiv mají značné množství nedostatků. Jejich základním problémem je, že jsou to materiály odlišné, které se pouze snaží navenek budít dojem původního materiálu. Naproti tomu geopolymerní matrice se snaží přiblížit původnímu materiálu i na strukturní úrovni, což umožňuje vytvoření mnohem věrnějšího materiálu nejen vizuálně, ale i co se týče fyzikálních a chemických vlastností.

III PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část popisuje použité suroviny, přístroje, jejich zkušební metody, a také provedené experimenty.

3.1 Použité suroviny a jejich označení

Pro jednotlivé pojivové směsi byly použity následující materiály:

- Metakaolin Mefisto K-05 (MK MF K-05)
- Metakaolin Mefisto L-05 (MK MF L-05)
- Vodní sklo sodné (V.S. Na⁺)
- Vodní sklo draselné (V.S. K⁺)
- Mletá vysokopecní struska (jms ost 380)

Jako plnivo byly použity následující písky:

- Normované písky ČSN I, ČSN II a ČSN III
- Šaštín (normální i mletý)
- Agro 3. etáž
- Hrušovany 1. etáž
- LASSES 0-2
- Speciálně upravený křemen (SUK)

Pro úpravu konzistence byla používána destilovaná voda.

3.2 Příprava zkušebních směsí

Postup přípravy všech zkušebních směsí byl naprosto shodný. Nejprve byla připravena z odvážených složek pojivová směs, jejíž konzistence byla upravena destilovanou vodou a až na závěr byla přidána předem homogenizovaná směs plniva.



Obr. 7 Míchací stroj pro používání pro přípravu zkušebních směsí

Do misky míchacího stroje byl nejprve nasypán metakaolin a za mírného míchání bylo přilito vodní sklo. Tato směs byla homogenizována po dobu 10 minut, a pak byla přidána jemně mletá struska. Po dalších 5 minutách byla konzistence pojivové směsi upravena přidávkou destilované vody. Do takto připraveného pojiva byla za stálého míchání přidávána předem připravená směs plniva. Takto vzniklá směs byla míchána do úplné homogenizace (nejčastěji 5 až 10 minut).

3.3 Složení zkušebních směsí

Tvorba jednotlivých směsí a jejich složení se měnila v závislosti na výsledcích předchozích experimentů. Nejprve byly zvoleny čtyři výchozí systémy lišící se svým pojivovým systémem. Jednalo se o směsi A, B, C a D, které obsahovaly 30 % hm. pojiva. Jejich přesné složení je uvedeno v tabulce 5.

směs	jms ost 380	MK MF K-05	MK MF L-05	V.S. Na ⁺	V.S. K ⁺	ČSN I	ČSN II	ČSN III	SUK	H ₂ O
A	100	100	–	150	–	900	350	–	200	52
B	100	100	–	150	–	900	350	–	200	42
C	100	–	100	–	150	900	350	–	200	41
D	100	–	100	–	150	900	350	–	200	33

Tab. 5 Přesné složení směsí A, B, C a D (hodnoty jsou vždy v g¹)

Tyto směsi byly po jednom dni vyjmuty z formy. Bohužel směsi B a D, kde bylo použito jako aktivátor draselné vodní sklo, byly vytvrzeny jen u povrchu a nebylo možné tyto vzorky použít pro stanovení fyzikálních vlastností.

¹ U vody je počítáno s hustotou $\rho = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a k jejímu odměřování byl použit odměrný válec na 100 ml

Směs A a C vykazovala naopak již po jednom dni velice dobré vlastnosti. Na charakteru povrchu byl však znatelný vyšší obsah pojiva, a proto bylo rozhodnuto snížit dosavadní množství pojiva o 30 % (nové označení A+, C+). Směs B a D byla připravena ve stejném složení, jen k vyjmutí z formy došlo až po 3 dnech (v dalším textu označeno jako B2, D2).

směs	jms ost 380	MK MF K-05	MK MF L-05	V.S. Na ⁺	V.S. K ⁺	ČSN I	ČSN II	ČSN III	SUK	H ₂ O
A+	70	70	–	105	–	900	350	–	200	33
C+	70	–	70	105	–	900	350	–	200	22

Tab. 6 Přesné složení směsí A+, C+ (hodnoty jsou vždy v g)

U těchto dvou směsí však došlo k razantnímu zhoršení jejich fyzikálních vlastností, a proto bylo rozhodnuto, že se obsah pojiva opět zvýší a to na 85 % původního obsahu. Vzhledem k tomu, že barevnost jednotlivých metakaolinů, výrazně ovlivňovala výslednou barevnost, bylo rozhodnuto v dalších směsích používat téměř výhradně MK MF K-05, který způsoboval zabarvení výsledného pískovce do žluta, zatímco MK MF L-05 do šeda (nepřirozené „betonové“ zabarvení).



Obr. 8 Ukázka barevného rozdílu při použití MK MF K-05 (vlevo) a MK MF L-05

U vzorků B, D nedošlo ani při pozdějším odstranění formy k výraznému zlepšení vlastností, proto bylo rozhodnuto použít draselné vodní sklo pouze v kombinaci se sodným sklem.

Pro následné pokusy s probarvováním pomocí přírodních písků, byla tedy zvolena pozměněná pojivová směs A (o 15 % méně pojiva). Pro možnost objektivního srovnání s ostatními vzorky byla připravena směs GP1 (A – 15 % pojiva) a pro porovnání vlivu draselného vodního skla v kombinaci se sodným sklem, byla připravena směs GP2, kde byla polovina množství sodného skla nahrazena draselným.

směs	jms ost 380	MK MF K-05	MK MF L-05	V.S. Na ⁺	V.S. K ⁺	ČSN I	ČSN II	ČSN III	SUK	H ₂ O
GP1	85	85	–	127,5	–	900	350	–	200	30
GP2	85	85	–	63,8	63,8	900	350	–	200	30

Tab. 7 Přesné složení směsí GP1 a GP2

Následně bylo připraveno šest směsí s různými plnivy, pomocí nichž mělo být dosaženo věrohodnějšího a přirozenějšího vzhledu těchto umělých pískovců. Jednotlivé směsi jsou označeny P1 až P6. U směsi P5 bylo použito probarvení pomocí změny složení pojiva, pro dosažení světlejšího žluto-šedého tónu (kombinace MK MF K-05 a L-05).

Směs	jms ost 380	MK MF K-05	MK MF L-05	V.S. Na ⁺	ČSN I	ČSN II	ČSN III	Hrubý písek	Mletý písek	SUK	H ₂ O
P1	85	85	–	127,5	900	250	–	Šaštín 100 g	Šaštín 200 g	200	33
P2	85	85	–	127,5	–	250	–	Šaštín 900 g	Šaštín 200 g	–	30
P3	85	85	–	127,5	–	–	–	Agro 3. etáž 350 g, LASSES 0-2 900g (jemné)	Hrušovan y 1. etáž 200 g	–	30
P4	85	85	–	127,5	–	–	–	Agro 3. etáž 350 g, LASSES 0-2 900g (jemné)	–	200	37
P5	85	45	40	127,5	900	300	50	–	–	200	30
P6	85	85	–	127,5	450	300	50	–	Šaštín 450 g	Bratčice 200 g	30

Tab. 8 Přesné složení směsí P1, P2, P3, P4, P5 a P6

Pro pokus o vytvoření barevné kresby umělého pískovce, byla vytvořena směs P7, která se skládala ze směsí GP1 a P5. Do formy byly tyto směsi dusány střídavě, což dalo vzniknout jemné kresbě, která podporuje dojem přírodního pískovce.

Ve dvou případech (dva zkušební trámečky) byla jako třetí vrstva umístěna směs písku ČSN III se sodným draselným sklem, vždy v množství 50 g ČSN III a 10 g sodného vodního skla. Tato vrstva měla imitovat hrubozrnné mezivrstvy, které jsou obvyklé u některých typů pískovců (Kocbáře).

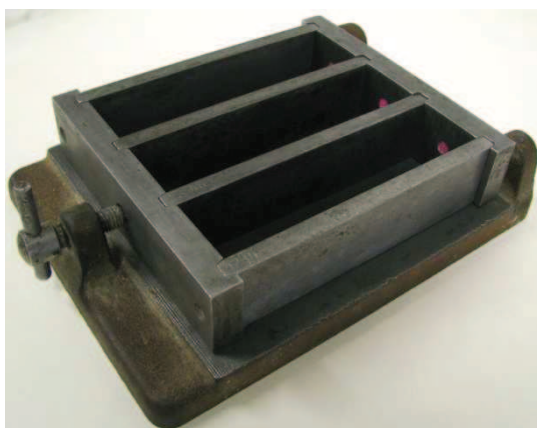
První sada P7 byla vyjmuta z formy hned následující den, ale vzhledem k nedostatečnému vyschnutí trámečků nebyla hmota ještě dostatečně kompaktní a trámečky, tak byly znehodnoceny. Z tohoto důvodu byla druhá sada s označením P7+ ihned po odformování zbavena opatrně formy a trámečky byly ponechány vyschnout na vzduchu. Tento způsob umožnil již následující den zjistit poměrně dobré fyzikální vlastnosti.



Obr. 9 Špatné vytvrzení při prvním pokusu odformování směsi P7

3.4 Příprava zkušebních vzorků

Pro přípravu zkušebních vzorků byla zvolena ocelová forma pro přípravu tří normovaných hranolů 4 x 4 x 16 cm. Forma byla vždy před přechováním směsi vystříkána silikonovým separátorem, který chránil stěny formy před možným negativním působením směsi, ale hlavně zabraňoval možnému přichycení směsi na stěnách formy. Směs byla do připravené formy dusána pomocí dřevěného hranolku a kladívka. Povrch hranolků byl na závěr uhlazen kovovou špachtlí. Vzorky byly vytvrzovány na volném vzduchu při laboratorních podmínkách.



Obr. 10 Ocelová forma pro tvorbu zkušebních trámečků 4 x 4 x 16 cm

K vyjmutí hranolků docházelo nejčastěji po jednom dni, ale v určitých případech, kdy to nebylo vzhledem k nekompaktnosti (nevytvrzení) směsi možné (viz dále), byly hranolky vyjímány i po sedmi dnech.

Pro zjištění vhodnosti směsi pro tvorbu reliéfů a jejich kopírovacích vlastností, byly použity v některých případech i silikonové formy.

3.5 Použité zkušební metody

U vytvrzených zkušebních vzorků byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 1 a 28 dnech. V některých případech byly stanovovány pevnosti i po 7 dnech (první zkušební směs a konečné směsi).

U vybraných směsí byla provedena zkouška tvorby výkvětů a byla stanovena objemová hmotnost.

3.5.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu, stejně jako stanovení pevnosti v tlaku bylo prováděno na přístroji BS-310. Jedná se o hydraulický lis pro zkoušku cementových zkušebních těles s lamačkou (BS-10), určený pro zkoušky podle EN 196, ISO 679 a dalších norem. (22)



Obr. 11 Hydraulický lis BS-310 s lamačko BS-10

V technickém listu přístroje jsou uvedena tato základní data:

	BS-310	BS-10
Jmenovitá lisovací síla [kN]	300	10
Minimální lisovací síla [kN]	6	0,2
Rychlost zatěžování [Ns^{-1}]	0,3÷99,9 k	5÷999
Přesnost měření ² [%]	±1	±1
Maximální tlak hydrauliky	18,5 MPa	

Tab. 9 Technické údaje lisu pro zkoušku cementových zkušebních těles s lamačkou BS-310 (22)

Při měření se postupovalo podle EN ČSN 197-2 a v pracovním programu byly nastaveny tyto údaje:

	Pevnost v tlaku (BS-310)	Pevnost v tahu za ohybu (BS-110)
Nárůst [kN/s]	2,4	0,08
Hydraulický offset [%]	24	24
Šum [%]	0,8	1

Tab. 10 Pracovní nastavení hydraulického lisu

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Zkušební trámeček byl umístěn do zkušebního prostoru dle nastavených zarážek tak, že původní horní strana byla proti směru zatěžování pootočená o 90° (viz obrázek níže). Po umístění trámečku bylo zahájeno měření a přístroj automaticky při daném nastavení proměřil pevnost v tahu za ohybu a získané údaje zapsal do tabulky. Po měření byl vždy trámeček přelomen na dvě poloviny, které byly použity pro následné měření pevnosti v tlaku. Toto měření bylo pro každou směs prováděno většinou pouze jednou, a proto mohou být získané výsledky zatíženy určitou chybou.

² od 5 % do 100 % jmenovité lisovací síly



Obr. 12 Způsob uložení trámečků do zkušebního prostoru při měření pevnosti v tahu za ohybu

Stanovení pevnosti v tlaku

Pro stanovení pevnosti v tlaku byly vždy použity dvě poloviny trámečků získané při předchozí zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Vzorky byly opět uloženy do lisu dle zarážek a po uzavření bezpečnostního krytu bylo spuštěno automatické měření. Byly získány dvě hodnoty (dvě poloviny trámečků stejného vzorku) z nichž byl vypočítán aritmetický průměr.



Obr. 13 Umístění zkušební vzorku při zjišťování pevnosti v tlaku

Zatěžování vzorku je zaznamenáváno v kN/s a výsledné hodnoty jsou automaticky softwarem dopočítány na MPa. Zatěžovaná plocha je 4 x 4 cm (1600 mm²), a proto je výsledný vzorec pro přepočet síly:

$$P[\text{MPa}] = \frac{F[\text{kN}]}{S[0,0016\text{m}^2]}$$

3.5.2 Tvorba výkvětů

Jedná se o orientační zkoušku, která velice jednoduše prokáže přítomnost vodorozpustných solí v jednotlivých směsích. Výsledky je však velice obtížné objektivně zhodnotit a kvantifikovat. Také určení konkrétního typu vykrystalizované soli by vyžadovalo doplňující testy.

Pro tento experiment byly zvoleny následující zkušební vzorky:

- P7+ jako konečná směs

- GP1 a GP2 pro porovnání vlivu použití samotného sodného vodního skla a kombinace sodného a draselného vodního skla
- B a D (oba vzorky nebyly kompletní vzhledem k problémům s odformováním popsaným výše) pro porovnání tvorby výkvětů na vzorcích s draselným vodním sklem.



Obr. 14 Tvorba výkvětů, původní stav

Zkušební vzorky byly umístěny do nádoby s destilovanou vodou, která díky porézní struktuře postupně vzlínala vzhůru. Vzorky byly dotovány vodou po dobu sedmi dní a po té byly vysušeny a zhodnoceny.

3.5.3 TG-DTA

Termická analýza umožňuje sledovat pochody probíhající při zahřívání nebo chlazení vzorku (pevných látek, minerálů, hornin). Sledovanými pochody jsou dehydratace, oxidace, tepelná disociace, krystalizace, tání, sublimace, polymerace, fázové přeměny a jiné změny. TG (termogravimetrie) registruje změny hmotnosti vzorku v závislosti na čase a DTA (diferenční termická analýza) sleduje teplotní rozdíl mezi analyzovaným vzorkem a referenční látkou. Jedná se tedy o kombinaci dvou metod – simultánní termickou analýzu (STA).

K využití této metody bylo přikročeno, kvůli pokusu o objasnění špatného vytvrzování směsí obsahujících draselné vodní sklo. Tato analýza je schopná prokázat vznik rozdílných struktur popřípadě sloučenin, a tak potvrdit nebo vyvrátit domněnku, že v případě draselného a sodného vodního skla nevzniká typově stejná struktura o shodném složení.

Pro analýzu byly odebrány vzorky ze směsí B, D (draselné vodní sklo) a pro srovnání také ze směsi C. Tyto dokonale vysušené vzorky směsí byly pomlety na vibračním mlýnu a předány k analýze.

IV. VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Získané hodnoty zkušebních směsí jsou uvedeny v tabulce č. 11 a ve sloupcovém grafu.

Směs	1 den [MPa]	7 dní [MPa]	28 dní [MPa]
A	1,99	4,27	4,79
B	0,39	3,36	2,17
C	2,99	3,51	3,54
D	–	–	–
A+	0,64	0,75	0,88
B 2	–	–	1,85
C+	0,48	0,69	0,61
D2	–	1,78	–
GP1	1,16	–	3,13
GP2	0,35	–	3,08
P1	1,46	–	3,98
P2	2,56	–	4,47
P3	0,78	–	1,64
P4	1,73	–	5,96
P5	1,74	–	4,84
P6	0,27	–	3,99
P7 +	2,12	4,07	4,61
Božanov	4,6		
Mšené-lázně	1,3		
Podhorní Újezd	2,1		

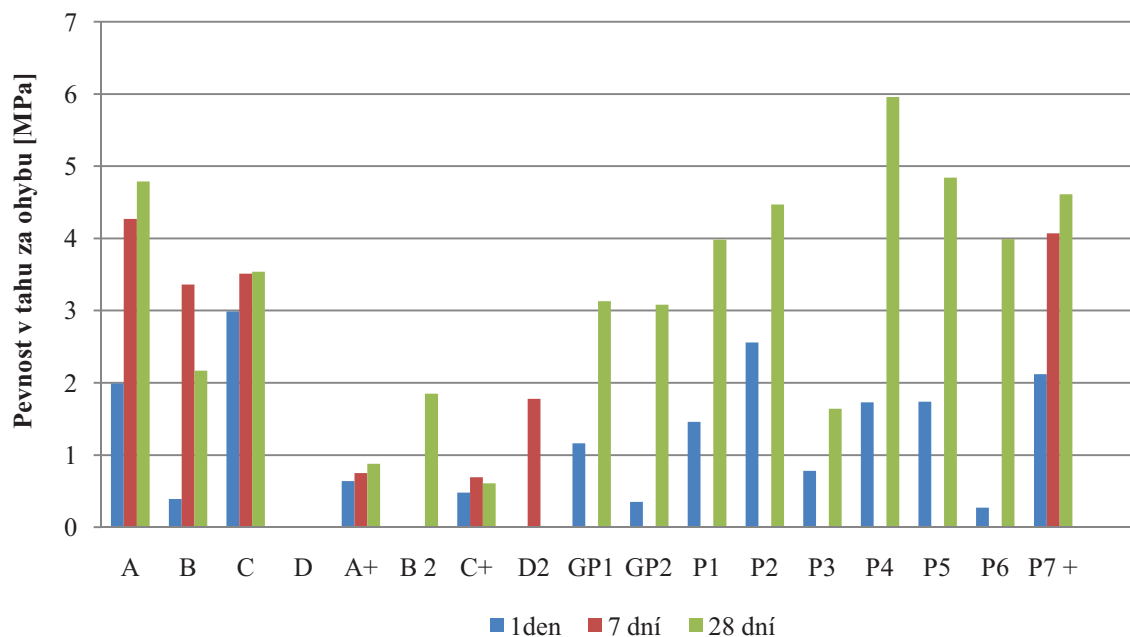
Tab. 11 Hodnoty pevností v tahu jednotlivých směsí a některých přírodních pískovců (více viz tab. 1)

U směsí B a C+ (šedá políčka) můžeme pozorovat snížení 28 denní pevnosti oproti 7 denní. Tento pokles můžeme nejpravděpodobněji vysvětlit náhodnou chybou, pokud si uvědomíme, že u každé z těchto směsí byl zkoušen pouze jeden trámeček pro orientační zjištění.

Velice zajímavý je vývoj pevností u směsí P1 až P4, které obsahují stejný pojivový systém a liší se pouze typem plniva. Tyto rozdíly jsou pravděpodobně způsobeny různým granulometrickým složením a neidentifikovanými příměsemi (jedná se o těžené písky bez úprav).

Pokud srovnáme hodnoty pevností přírodních pískovců s dosaženými hodnotami zkušebních směsí (především P1 až P7) můžeme konstatovat, že tyto hodnoty se pohybují v rozmezí hodnot přírodních pískovců. Co se týče závěrečné směsi P7+, tak ta průměrné hodnoty pevností přírodních pískovců výrazně přesahuje.

Vývoj pevností v tahu za ohybu jednotlivých směsí



Obr. 15 Graf vývoje pevností v tahu jednotlivých zkušebních směsí

4.1 Výsledky stanovení pevností v tlaku

Získané pevnosti v tlaku jsou uvedeny v tabulce 12 a v grafu na obrázku 15. V tabulce jsou opět uvedeny hodnoty pevností v tlaku některých přírodních pískovců (viz tabulka 1).

směs	1 den [MPa]	7 dní [MPa]	28 dní [MPa]
A	10,96	36,42	35,48
B	0,6	9,31	7,75
C	17,84	30,68	30,78
D	–	–	–
A+	6,43	5,48	6,03
B 2	–	–	8,15
C+	2,56	4,95	4,19
D2	–	7,03	–
GP1	7,68	–	18,99
GP2	1,3	–	11,54
P1	9,47	–	27,33
P2	12,75	–	31,09
P3	3,32	–	11,19
P4	9,67	–	32,84
P5	11,1	–	32,11
P6	–	–	15,96
P7 +	10,37	29,22	31,28

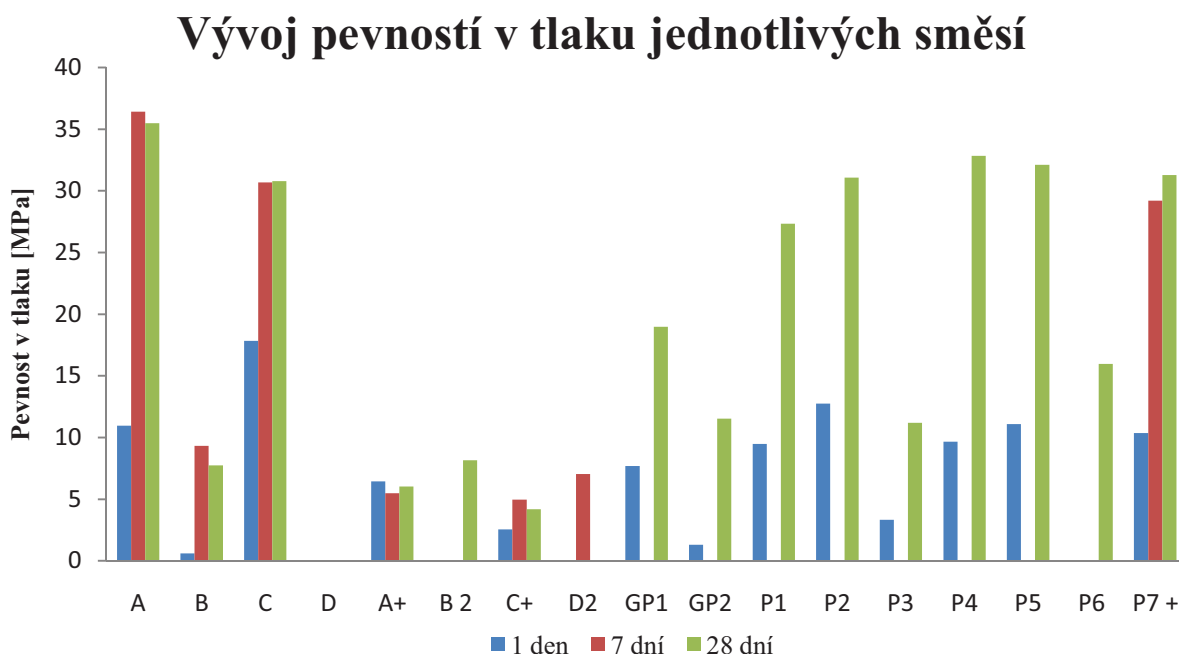
Tab. 12 Hodnoty pevností v tlaku jednotlivých směsí

Směs	Pevnost v tlaku [MPa]
Božanov	66
Mšené-lázně	36
Podhorní Újezd	28

Tab. 13 Hodnoty pevností v tlaku některých přírodních pískovců

Jak je patrné z tabulky 13 nebo 1, pevnosti v tlaku jednotlivých typů pískovců se značně rozcházejí, ale z uvedených údajů vyplývá, že by neměly klesnout pod cca 20 MPa.

Jak je vidět ze získaných hodnot, značná část směsí těchto pevností nedosáhla. Ze všech zkoušených směsí dosáhla nejvyšší pevnosti v tlaku směs A a ze závěrečných směsí imitujících pískovec směs P4 a P5. Nejhuře naopak dopadly směsi A+ a C+, kde byl obsah plniva pouze necelých 15 %. Ze závěrečných směsí měla nejnižší pevnosti směs P3, která vykazovala i velice nízké pevnosti v tahu za ohybu.



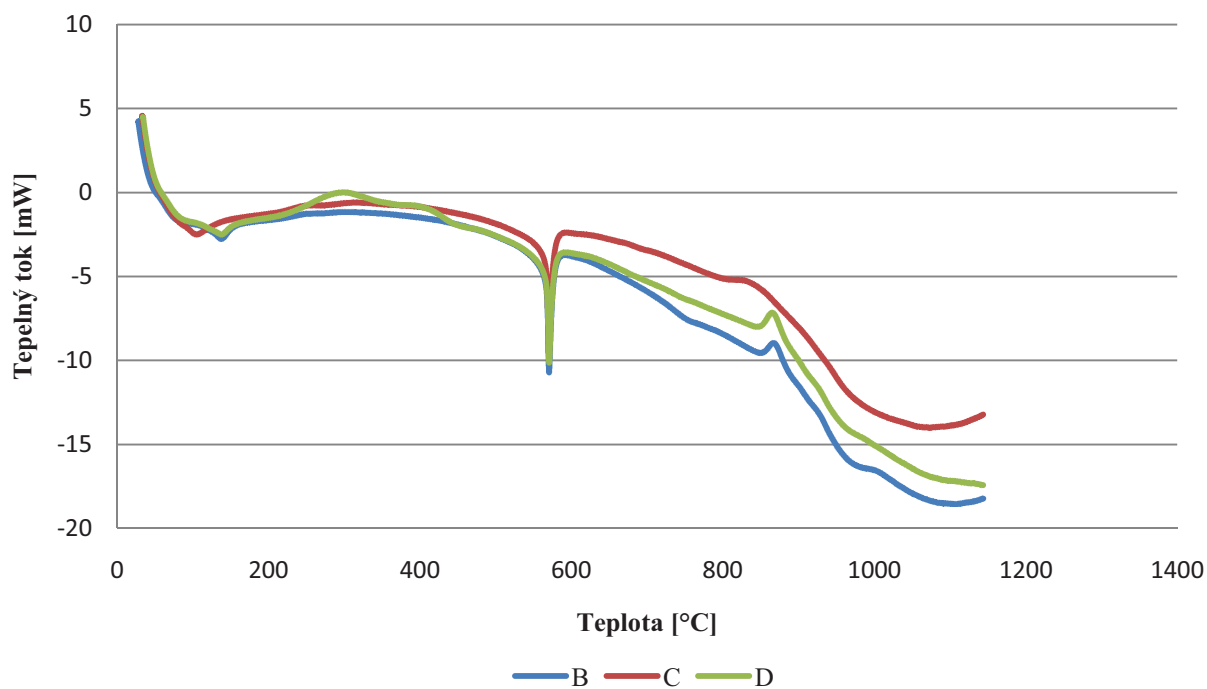
Obr. 16 Graf vývoje pevností v tahu jednotlivých zkušebních směsí

4.2 Výsledky TG-DTA

Při vyhodnocování křivky tepelných toků společně s křivkami hmotnostních úbytků je patrné téměř identické chování všech tří směsí. Lze proto předpokládat, že výsledné složení směsí s obsahem sodného i draselného vodního skla, je velice podobné.

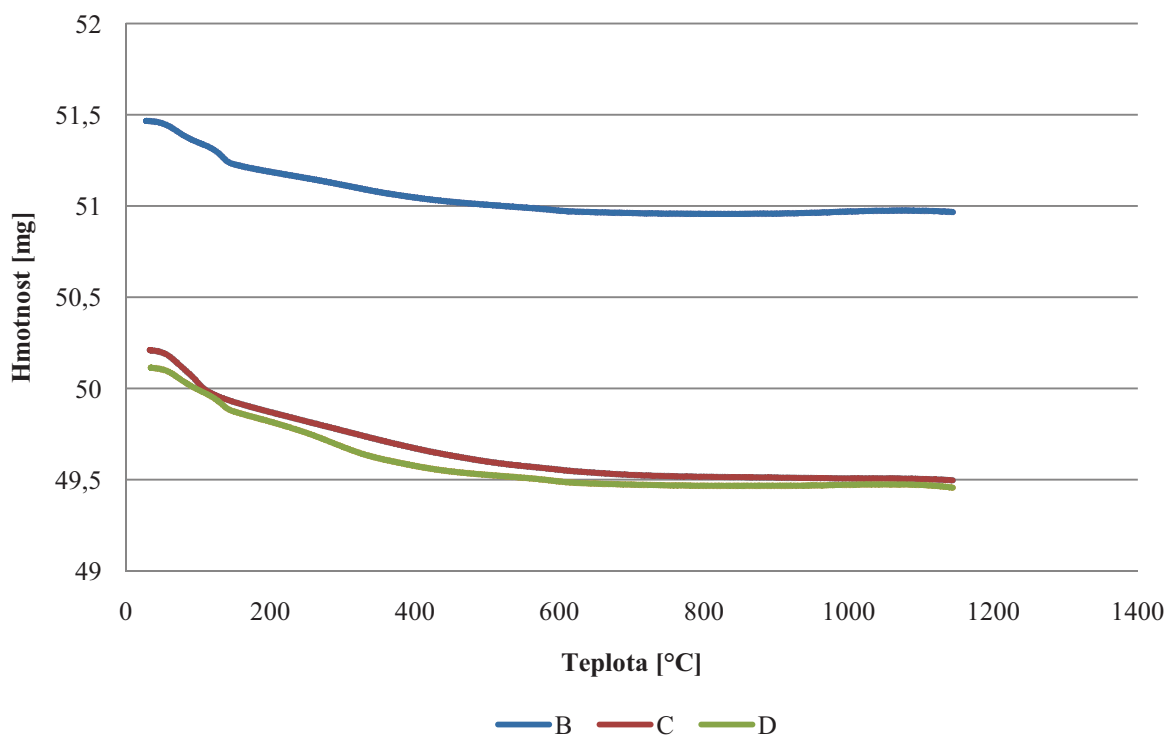
Z grafů je patrný první endoterm, při asi 150 °C -180 °C, který je doprovázen mírným hmotnostním úbytkem. Jedná se o odchod hydrátové vody. Nejvýznamnější endotermický pík okolo 600 °C je spojen s přeměnou SiO₂ z modifikace β na modifikaci α, což potvrzuje také hmotnostní křivka, která je v tomto místě beze změn. Poslední výrazný exoterm je pravděpodobně způsoben tvorbou gehlenitu při cca 900 °C, rovněž bez hmotnostní změny.

Grafické znázornění DT analýzy



Obr. 17 Grafický záznam DTA analýzy

Grafické znázornění TG analýzy



Obr. 18 Grafický záznam TGA analýzy

4.3 Výsledky pozorování tvorby výkvětů

Na vzorcích P7+ a GP1 byla již po jednom dni znatelná tvorba výkvětů. Oba vzorky oproti ostatním byly také mnohem více zavlhčené a voda vyvzlínala téměř až k vrcholu obou trámečků. Naopak vzorky B, D a GP2 nejevily po jednom dni ani náznaky výkvětů, ani výraznějšího vzlínání vody.

Po jednom týdnu byla situace obdobná. Na vzorcích obsahujících draselné vodní sklo nebyly žádné výkvěty pozorovány, kdežto na vzorcích s obsahem sodného vodního skla byly výkvěty velmi zřetelné. Drobné výkvěty se projevíly oproti prvnímu dni i na vzorku GP2.



Obr. 19 Tvorba výkvětů, stav vzorků po jednom týdnu ihned po vyjmutí z vodní lázně

Jak je zřetelně vidět na obrázku vzorky obsahující draselné vodní sklo jsou prakticky bez náznaku výkvětů. Nižší vzlínavost je však zřejmě dána vyšším stářím vzorku a jiným složením.

Na základě tohoto experimentu lze tvrdit, že vzorky s obsahem draselného vodního skla jsou vůči tvorbě výkvětů mnohem odolnější. Je nutné si uvědomit, že pro praktické použití geopolymerního pískovce je možná tvorba výkvětů velkou překážkou a bylo by nutné tento problém bezpečně vyřešit.

4.4 Stanovení objemové hmotnosti

Pro orientační zjištění objemové hmotnosti, byly vzorky P1 až P7+ samostatně zváženy a z těchto hodnot byla při známém objemu (trámeček 4 x 4 x 16 cm) tato hodnota vypočtena.

Směs	Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
P1	494,2	1900
P2	548,2	2100
P3	477,3	1900
P4	442,8	1700
P5	492,7	1900
P6	492,4	1900
P7+	518,7	2000

Tab. 14 Objemové hmotnosti některých směsí

4.5 Vizuální hodnocení jednotlivých směsí

4.5.1 Základní zkušební směsi A, A+, B, B2, C, C+, D, D2

Vzorek směsi A

Tento vzorek se žlutým zbarvením s lehkým nádechem do oranžova (způsobeno barevností MK MF K-05). Povrch vysoce kompaktní, ale nebudí dojem přírodního kamene, je zde příliš zřetelná přítomnost vyššího množství pojiva.



Obr. 20 Vzorek A, uprostřed detail lomu vzniklý po zkoušce pevnosti

Vzorek směsi B (B2)

Tento vzorek již neměl oranžový nádech a celkový dojem byl velmi dobrý. Povrch však nebyl kompaktní (viz výsledky pevností) a snadno se drolil.

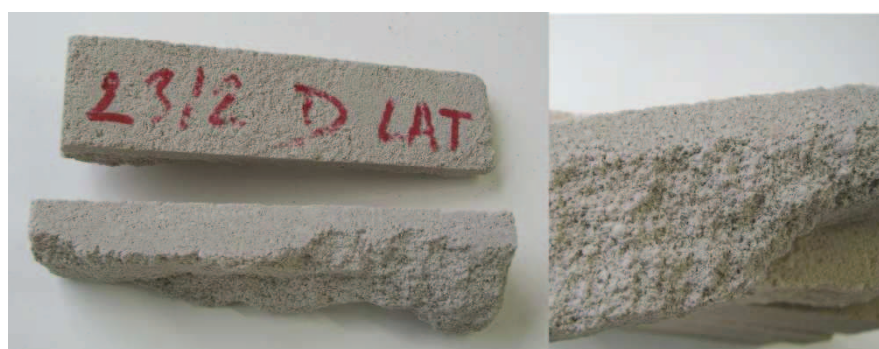


Vzorek směsi C a D

Na barevnosti vzorku C stejně jako vzorku D se výrazně podílí MK MF L-05, který má šedou barvu. Proto i zbarvení tohoto vzorku je spíše podobné betonu než přírodnímu pískovci. Toto byl hlavní důvod proč se u dalších směsí dávala přednost MK MF K-05. Je nutné však poznamenat, že během dvou měsíců od odformování intenzita zbarvení lehce poklesla.



Obr. 21 Vzorek směsi C, vpravo detail lomu po zkoušce pevnosti



Obr. 22 Vzorek směsi D s výrazně šedým zbarvením

Vzorky směsi GP1 a GP2

Směs GP1 měla sloužit především pro srovnání fyzikálních vlastností konečného pojivového systému (85 % původního množství u směsi A). Směs GP2 měla za úkol ukázat vliv směsného použití sodného a draselného vodního skla. Oba vzorky měly velice podobnou barevnost (GP2 má světlejší odstín), která oproti vzorku A již postrádala nepřírozený oranžový nádech a její jemně nažloutlé zbarvení působilo velice příjemným dojmem. Oproti směsi A, je zde na úkor plniva ČSN II přidáno 50 g ČSN III, což pozitivně přispělo k věrohodnosti povrchové struktury.



Obr. 23 Vzorek směsi GP1



Obr. 24 Vzorek směsi GP2

Vzorky směsi P1 až P6

Směsi P1 až P4 měly lehce zelené zbarvení, které bylo způsobeno barevností použitých písků v kombinaci s pojivem. Na detailu u vzorku P2 je možné vidět lehkou, spíše však nepřirozenou kresbu, která vznikla smísením P2 a P1 stejně jako tomu bylo později u konečné směsi P7+. K tomuto smísení došlo pouze u jednoho ukázkového trámečku. Jinak je výsledná barevnost obou prvních směsí poměrně nezajímavá a neatraktivní.



Obr. 25 Vzorek směsi P1



Obr. 26 Vzorek směsi P2 s detailem na kompaktní strukturu lomu

Směs P3 a P4 obsahovala vyšší množství hrubších částic, což se výrazně projevilo na jejich konečném vzhledu. Bohužel i u těchto vzorků je výsledná barevnost neatraktivní a spíše nepříjemná. Převládají zde žlutozelené tóny, které v kombinaci s hrubšími zrny působí dosti uměle.

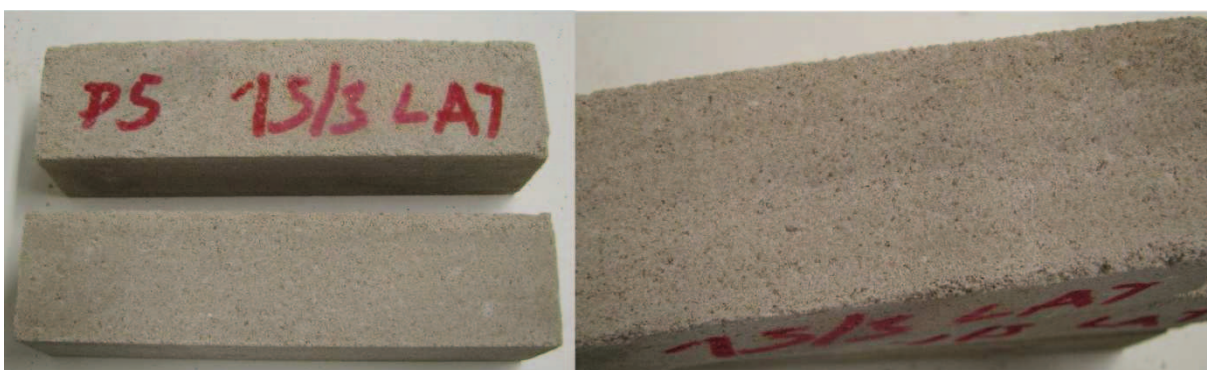


Obr. 27 Vzorek směsi P3



Obr. 28 Vzorek směsi P4 s detailem na nepovedenou aplikaci vrstvy písku ČSN III

Směs P5 na rozdíl od předchozích směsí nebyla barvena pomocí barevných písků ale barevností pojiva (směs MK MF K-05 a L-05). Vlivem šedého zbarvení MK MF L-05 bylo docíleno světle šedě-žlutého zbarvení, které bylo velice podobné zbarvení přírodního pískovce z lokality Krákorka.



Obr. 29 Vzorek směsi P5

Vzorek P6 již měl opět nežádoucí zbarvení vlivem použitého mletého i normálního písku (zde Bratčice-mletý, Šaštín) stejně jako u vzorků P1 až P4. Jinak byla struktura povrchu velice příjemná (jemnější rozložení kameniva jako u jemnozrnnějších pískovců) a celá struktura byla kompaktní (lomová část se nedrolila)



Obr. 30 Vzorek směsi P6 s detailem kompaktního lomu

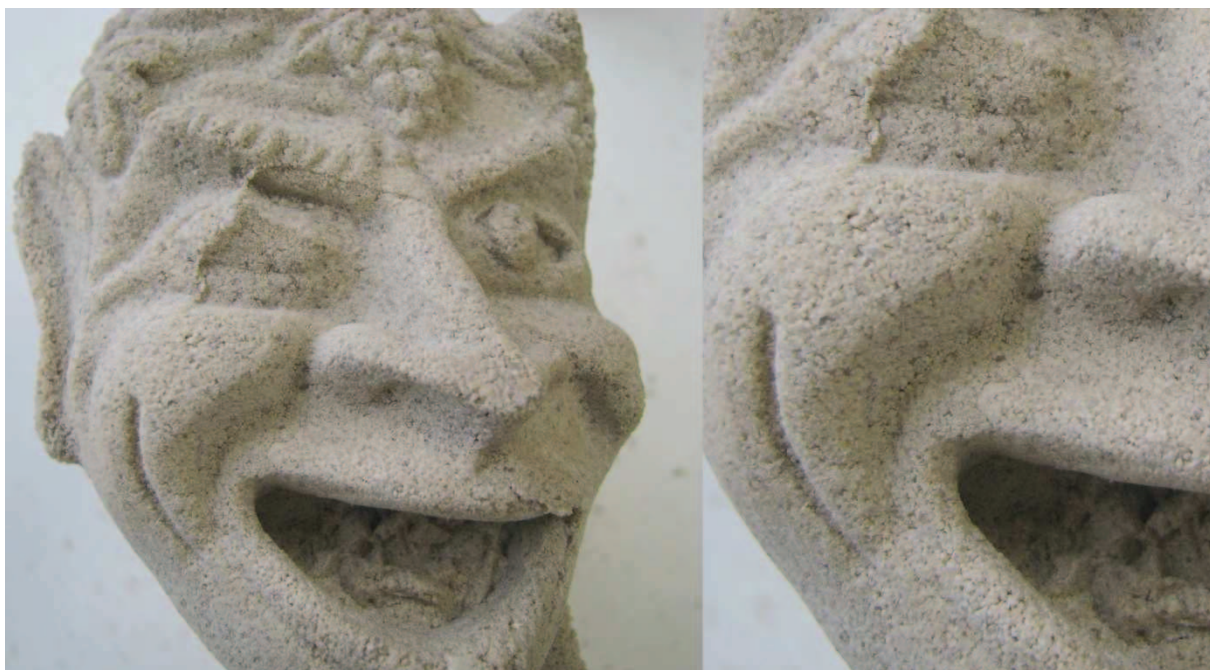
Vzorek směsi P7+

Pro vytvoření výsledného vzorku byly z hlediska předchozích vlastností, jak vizuálních tak fyzikálních vybrány směsi P5 a GP1. Tímto výběrem měl být zajištěn vznik umělého pískovce světlého zbarvení s jemně tmavší kresbou, což se i povedlo. Po předchozích pokusech u vzorku P4, byl i zde učiněn pokus o vložení samostatné vrstvy hrubšího kameniva (ČSN III), které by podpořilo přírodní vzhled.



Obr. 31 Vzorek směsi P7+ s dobře viditelnou dvoubarevnou kresbou. Na detailu je dobře viditelná vložená vrstva písku ČSN III.

Tento vzorek se díky zbarvení jednotlivých vrstev i jejich kombinaci nejvíce podobal přírodnímu pískovci. Z tohoto důvodu byl učiněn ze zbytků směsi pokus o odformování náročnějšího reliéfu v silikonové formě. Směs se ve formě výborně vytvrdila a dokonale okopírovala daný reliéf, jak lze vidět na následujícím obrázku.



Obr. 32 Maska vytvořená ze směsi P7+

V. ZÁVĚR

Práce měla za úkol nalézt vhodný pojivový systém a na jeho základě se pokusit o přípravu umělého pískovce, jehož zbarvení by bylo modulováno pouze zbarvenými přírodními písky a vlastní barevností pojivové směsi.

V první části byly nejprve zkoumány rozdíly v použitých komponentách čtyř základních pojivových systémů. Na základě špatného vytvrzování byly vzorky s obsahem draselného skla vyloučeny z dalších pokusů. Vzorky s obsahem MK MF L-05 měly nepřírozenou šedou barvu a proto byl pro další experimenty zvolen systém A s MK MF K-05 a sodným vodním sklem. Jako nejvhodnější se ukázal obsah pojiva okolo 17 % hm. Tento systém dosahoval velice solidních pevností v tlaku i v tahu za ohybu a na jeho povrchové struktuře nebyl vidět nadbytek pojiva, jako tomu bylo u původní směsi A.

Pro úpravu barevnosti byly zvoleny některé druhy přírodních písků v normální i mleté podobě. Bohužel se ukázalo, že tento způsob není příliš vhodný a kromě nepříliš vhodných barevností docházelo k značnému kolísání fyzikálních vlastností. To bylo způsobeno odlišným granulometrickým složením, ale také nečistotami, které se v těchto nenormovaných pískách přirozeně vyskytují. Jak se navíc ukázalo, usuzovat na barevnost výsledného pískovce podle barvy použitého písku není přesné. Výsledná barva se vlivem barevnosti pojivového systému, který není nikdy bezbarvý, a nejjemnější frakce (SUK, mletý písek) může od původního zbarvení písku značně vzdálit. Z těchto důvodů je plánování barevnosti v případě použití přírodních písků téměř výhradně experimentální záležitostí.

I přes tyto obtíže se podařilo vytvořit se závěrečnou směsí P7+ poměrně dobrou imitaci světlejšího typu pískovce s jemnou kresbou. Tvorba kresby je velice důležitá a napomáhá k dotvoření opravdu přirozeného vzhledu. Bohužel vytvoření náhodné a přirozené kresby je velice náročné a zde použitý technologický postup dusání není příliš vhodný.

Na závěr experimentů byla na vybraných vzorcích testována tvorba výkvětů. Tento experiment bohužel potvrdil, že v případě využití sodného vodního skla je tendence k tvorbě výkvětů mnohonásobně vyšší, než v případě vodního skla draselného. Tento aspekt je velice důležitý a v případě uplatnění geopolymerního pískovce v praxi, by musel být bezpečně vyřešen.

Práce potvrdila značné možnosti využití geopolymerního materiálu pro tvorbu umělých pískovců, ale zároveň ukázala i velké nedostatky nejen ve složení pojivových směsí a plniva, ale i v oblasti technologické. Tato oblast může výsledné vlastnosti výrazně ovlivnit a přispět tak ke skutečnému použití tohoto materiálu v praxi.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. RYBAŘÍK, Václav. *Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky*. Vyd.1. Hořice v Podkrkonoší : Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské, 1994. 218 s. ISBN 80-900041-5-6.
2. Geologická encyklopedie [online]. *Česká geologická služba*. [Online] 21. 11 2010. <<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl>>.
3. KOTLÍK, Petr. *Stavební materiály historických objektů : materiály, koroze, sanace*. Vyd.1. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 1999. 112 s. ISBN 80-7080-347-9.
4. SLAVÍK, Roman. *Reakční podmínky geopolymerace*. Zlín, 2009. 45 s. Teze dizertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. ISBN 978-80-7318-860-3.
5. SVOBODA, P, et al. *Současný stav Výzkumu v oblasti GEOPOLYMERŮ*. Vyd.1. Praha : Česká rozvojová agentura o.p.s., 2005. 49 s..
6. DELLA M. Roy: Alkali-activated cements, Opportunities and challenges, *Cement and Concrete Research*, The Pennsylvania State University 1988, no. 29, pp. 249-254.
7. ŠKVÁRA, František. Alkalicky aktivované materiály - geopolymery. *Informátor : Česká společnost pro výzkum a využití jílů*. Listopad 2007, 37, s. 1-3.
8. STRAKA, Pavel, et al. *Využívání odpadů ve výrobě stavebních hmot, Využití geopolymerních kompozitů pro účely obnovy a restaurování památek*. Vyd.1. Praha : Česká rozvojová agentura, o.p.s., 2007. 110 s.
9. DAVIDOVITS, Joseph. *Geopolymers : chemistry and application*. 2nd edition. Saint-quentin : Institut Géopolmére, 2008. 588 s. ISBN 9782951482012.
10. ŠESTÁK, Jaroslav, et al. *Some thermodynamic, structural and behavioral aspects of materials accentuating non-crystalline states* . Vyd.1. Nymburk : [s.n.], 2009. 607 s. ISBN 978-80-87269-06-0.
11. OPRAVIL, Tomáš, et al. Geopolymery na bázi metakaolinu aktivovaného sodnými a draselnými sloučeninami. In *Metakaolin 2008*. Brno : Fakulta stavební VUT v Brně, 2008. s. 80-85.
12. ČERVINKA, Josef. *Geopolymery - využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů*. Pardubice, 2008. 74 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování. Dostupné z WWW: <http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/29938/1/CervinkaJ_Geopolymery_RT_2008.pdf>.
13. VAVRO, Martin; PITCEN, František; MEC, Pavel. Studium vlastností metakaolínů vyrobených z alternativních jílových surovin. In . *Metakaolin 2010*. Brno : Fakulta stavební VUT v Brně, 2010. s. 116-121. ISBN 978-80-214-4064-7.
14. MÁCA, Petr. *The Influence on the Durability of Concrete*. Praha, 2009/2010. 16 s. Oborová práce. České vysoké učení technické v Praze.
15. SOLIK, Jaroslav. *Studium možnosti přípravy syntetických pískovců*. Brno, 2010. 41 s. Bakalářská práce. VUT v Brně.
16. *Silo Transport : Produkty* [online]. 2009 [cit. 2011-04-22]. Silo Transport. Dostupné z WWW: <<http://www.silotransport.cz/>>.
17. Vlastnosti geopolymerních materiálů na bázi popílku a mletého cihelného střeptu. In ŘEZNÍK, Bohuslav; BAYER, Patrik. *RECYCLING 2010 : Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin*. Brno : Asociace pro

rozvoj recyklace stavebních materiálů v české republice, 2010. s. 156. Dostupné z WWW: <http://www.arism.cz/dok/Sbornik_RECYCLING_2010.pdf>.

18. Vliv složení a množství draselného aktivátoru na mechanické vlastnosti alkalicky aktivovaných strusek. In FRÝBORTOVÁ, Iva. *Juniorstav 2008*. Brno : Fakulta stavební VUT Brno, 2008. s. 6. Dostupné z WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav2008_sekce/pdf/4_2/Frybortova_Iva_CL.pdf>.

19. ANTOŠ, Petr; KOUTNÍK, Petr Alkalické aktivátory metakaolinu. In METAKAOLIN 2008. 1. vydání. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2008. s. 5 - 10. ISBN 978-80-214-3582-7

20. DAVIDOVITS, Joseph. *Nové dějiny pyramid*. Vyd.1. Olomouc : Fontána, 2006. 287 s. ISBN 80-7336-341-0(váz.).

21. BS-130, Technický list pro. [Online]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

MK MF K-05	Metakaolin Mefisto K-05 (MK MF K-05)
MK MF L-05	Metakaolin Mefisto L-05 (MK MF L-05)
V.S. Na ⁺	Vodní sklo sodné (V.S. Na ⁺)
V.S. K ⁺	Vodní sklo draselné (V.S. K ⁺)
jms ost 380	Mletá vysokopecní struska (jms ost 380)
ČSN I, ČSN II, ČSN III	Normované písky
SUK	speciálně upravený křemen

PŘÍLOHY

Příloha: 1 Souhrnná tabulka všech získaných pevností pro jednotlivé směsi

	1 den		7 dní		28 dní		pozn.
směs	tah za ohybu	tlak	tah za ohybu	tlak	tah za ohybu	tlak	
A	1,99	10,96	4,27	36,42	4,79	35,48	
B	0,39	0,6	3,36	9,31	2,17	7,75	nepřesné trámečky
C	2,99	17,84	3,51	30,68	3,54	30,78	
D	–	–	–	–	–	–	nesoudržné
A+	0,64	6,43	0,75	5,48	0,88	6,03	
B 2	–	–	–	–	1,85	8,15	nesoudržné
C+	0,48	2,56	0,69	4,95	0,61	4,19	
D2	–	–	1,78	7,03	–	–	nesoudržné (jen 1 trámeček)
GP1	1,16	7,68	–	–	3,13	18,99	
GP2	0,35	1,3	–	–	3,08	11,54	
P1	1,46	9,47	–	–	3,98	27,33	
P2	2,56	12,75	–	–	4,47	31,09	
P3	0,78	3,32	–	–	1,64	11,19	
P4	1,73	9,67	–	–	5,96	32,84	
P5	1,74	11,1	–	–	4,84	32,11	
P6	0,27	–	–	–	3,99	15,96	
P7 +	2,12	10,37	7,07	29,22	4,61	31,28	vyjmuto ihned po odformování